

مقایسه شبکه پایش کروم آبخوان دشت بیرجند با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تئوری آنتروپی

عباس خاشعی سیوکی، علی شهیدی و سمیرا رهنما

دوره ۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحات ۲۳۱ - ۲۲۰

Vol. 7(2), Summer 2021, 220-231

DOI: 10.22034/jewe.2020.254396.1448

**Comparison of Birjand Aquifer Chromium
Monitoring Network Using Principal Component
Analysis (PCA) and Entropy Theory**

KhasheiSiuki, A., Shahidi, A. and Rahnama, S.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

خاشعی سیوکی، ع.، شهیدی، ع. و رهنما، س. (۱۴۰۰). طراحی شبکه پایش کروم آبخوان دشت بیرجند با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تئوری آنتروپی. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۲، صفحات: ۲۳۱-۲۲۰.

Citing this paper: Khashei Siuki, A., Shahidi, A. and Rahnama, S. (2021). Comparison of Birjand aquifer chromium monitoring network using principal component analysis (PCA) and entropy theory. Environ. Water Eng., 7(2), 220-231. DOI: 10.22034/jewe.2020.254396.1448

مقاله پژوهشی

مقایسه شبکه پایش کروم آبخوان دشت بیرجند با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تئوری آنتروپی

عباس خاشعی سیوکی^{۱*}، علی شهیدی^۲ و سمیرا رهنما^۳

^۱استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۲دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۳دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

*نویسنده مسئول: abbaskhashei@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۱۰/۰۳]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۰۹/۲۲]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۸/۰۴]

چکیده

به منظور مدیریت کارا و مؤثر منابع آب زیرزمینی، تعیین نقاط مهم جهت نمونه برداری به لحاظ کاهش حجم نمونه‌ها و صرفه‌جویی در هزینه و زمان بسیار مهم است. در این مطالعه با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تئوری آنتروپی که روشی کاربردی در ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی می‌باشد به طراحی شبکه پایش کروم آبخوان دشت بیرجند پرداخته شد. در این پژوهش، ۲۵ چاه بهره‌برداری آبخوان دشت بیرجند با طول آماری ۵ yz (۱۳۹۳-۱۳۹۷) مورد بررسی قرار گرفت. در منطقه مورد مطالعه میانگین سالانه پارامتر کروم (شش ظرفیتی) آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تئوری آنتروپی مورد بررسی قرار گرفت تا چاه‌های نمونه برداری مؤثر در آبخوان این دشت مشخص گردد. نتایج نشان داد که از بین ۲۵ چاه موجود در منطقه مورد مطالعه، می‌توان ۱۵ چاه به عنوان چاه شاخص کروم آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند معرفی نمود که از پراکندگی خوبی در منطقه برخوردار هستند که می‌تواند در کاهش هزینه‌های نمونه برداری نقش مهمی داشته باشد. همچنین جهت در نظر گرفتن عامل زمان در تغییرات این روش در دو دوره زمانی ۲ و ۳ yz ساله انجام شد. نتایج نشان داد که در دوره زمانی ۲ yz (۱۳۹۳-۱۳۹۴) ۱۹ چاه به عنوان چاه مؤثر انتخاب شدند که در دوره زمانی ۳ yz (۱۳۹۵-۱۳۹۷) این تعداد به ۱۷ چاه تقلیل پیدا کرد. تئوری آنتروپی نشان داد که کلیه چاه‌های موجود در منطقه از اهمیت یکسانی در طراحی شبکه پایش برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی؛ آنالیز مؤلفه‌های اصلی؛ چاه مؤثر؛ دشت بیرجند



۱- مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین مسائلی که محیط‌زیست را به شدت تهدید می‌کند، آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌باشد که از طرق مختلف همانند فعالیت‌های انسانی، صنعتی و غیره ایجاد می‌شوند. ارزیابی کیفیت آب و شناسایی عوامل آلاینده و نقاط آلوده در مناطقی که از منابع آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب استفاده می‌شود بسیار با اهمیت است. از آنجایی که ۸۰٪ بیماری‌های جهان از راه آب منتقل می‌شود، کنترل آلاینده‌های آب اهمیت ویژه‌ای دارد (Shahriyari et al. 2010).

با توجه به پیچیدگی‌های سامانه‌های منابع آب، در اغلب موارد تصمیم‌ها بدون اطلاعات کافی گرفته می‌شوند. معمولاً در تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر عدم قطعیت، تمایل به تصمیم‌گیری محافظه‌کارانه وجود دارد. تقریباً در تمامی موارد، اطلاعات کافی برای توصیف رفتار اتفاقی چنین سامانه‌هایی در دسترس نیست. بسیاری از سامانه‌های مهندسی از جمله سامانه‌های محیط‌زیستی و آبی ذاتاً پیچیده بوده و درک محدودی از جزئیات این سامانه‌ها وجود دارد. ارزیابی کارایی سامانه‌های پایش کیفی منابع آب و بهبود مؤلفه‌های مختلف این سامانه‌ها مانند مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های پایش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دلیل اصلی اهمیت این موضوع، هزینه‌های قابل توجه این سامانه‌ها می‌باشد. احداث چاه‌های پیرومتری جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی مناطق مختلف آبخوان هزینه‌های زیادی اعم از ماشین‌آلات حفر چاه، لوله‌گذاری، نگهداری، نمونه‌برداری و غیره داشته و در مواردی حفر چاه‌ها به دلیل عدم ارتباط و انتقال اطلاعات با سایر چاه‌ها و همچنین در مواردی به دلیل عدم احداث چاه در محل مناسب، کارایی مناسبی نداشته و هزینه‌های صورت گرفته بی‌اثر می‌شود. طوری که کاهش اطلاعات مازاد می‌تواند در کاهش هزینه‌های سامانه، بدون کاهش میزان و دقت اطلاعات حاصل، تأثیر قابل توجهی داشته باشد. همچنین از بحث‌های مهم در بخش آب‌های زیرزمینی، آلودگی آب‌ها ناشی از فلزات سنگین می‌باشد. فلزات سنگین با توجه به ثبات شیمیایی، تجزیه‌پذیری ضعیف و داشتن قدرت تجمع زیستی در بدن موجودات زنده، به سرعت به آلاینده‌های سمی تبدیل می‌شوند

(AsghariMoghaddam and Adigozalpuor 2016). فلزات موجود در منابع آب به صورت طبیعی و یا بر اثر آلودگی وارد منابع آب می‌شوند. هوازدگی طبیعی سنگ‌ها و خاک‌هایی که با منابع آب در تماس هستند، بزرگ‌ترین منبع آلودگی فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی‌اند (AsghariMoghaddam and Adigozalpuor 2016). فلزات سنگین همیشه در ترکیب طبیعی محیط‌زیست وجود داشتند و در شرایط طبیعی در غلظت‌های پایین یافت می‌شدند، اما در اثر فعالیت‌های انسانی مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین وارد محیط‌زیست شدند (Rajaei et al. 2012).

نتایج استفاده از روش‌های PCA جهت ارزیابی کیفیت آب شبکه پایش رودخانه سنت جانز فلوریدای آمریکا نشان داد کلسیم، منیزیم، قلیایت، نیتروژن کل، نترات محلول و نیتريت از جمله پارامترهای مؤثر در ارزیابی کیفیت آب این رودخانه بودند (Ouyang 2005). مطالعه هیدروشیمیایی آب دریاچه سد کارده و منابع آب زیرزمینی منطقه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی نمونه‌های آب نشان داد که کیفیت منابع آب زیرزمینی و سطحی به‌طور گسترده‌ای وابسته به لیتولوژی است (Mohammadzadeh and Heydarizad 2011). در مطالعه‌ای به منظور بررسی افزایش میزان فلوراید در آب شرب در ۱۱۱ چاه واقع در دو منطقه شانکزی و اینر مانگولیا در چین، روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی را به کار بردند. بر اساس نتایج آن‌ها، افزایش میزان فلوراید در منطقه مانگولیا، عمدتاً ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و معدن‌کاوی بود (Hu et al. 2013). همچنین با استفاده از PCA و تحلیل خوشه‌ای^۱ (CA) کیفیت آب دریاچه آنچار کشمیر هند طی ۴ فصل و برای ۱۳ پارامتر کیفی مورد تحلیل قرار داده شد. نتایج نشان داد که روش PCA به استخراج و شناسایی عوامل تغییر کیفیت آب در فصول مختلف دریاچه کمک می‌کند که عمدتاً مربوط به فاضلاب‌های خانگی، رواناب کشاورزی و تنوع فصلی بود (Ishtiyag et al. 2017).

نتایج پژوهشی که توسط Shahryari et al. (2011) با هدف تعیین میزان کروم و مس در آب‌های زیرزمینی و شبکه آب شرب شهر بیرجند در سال ۸۹-۱۳۸۸ انجام شد نشان داد که با وجود

¹Cluster Analysis (CA)

تعیین تعداد و موقعیت بهینه چاه‌های مشاهده‌ای توسط استفاده نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد تعداد چاه‌های مشاهده‌ای برابر ۲۸ حلقه (۴۲ چاه مشاهده‌ای) می‌باشد که بیان‌کننده کاهش ۵۵٪ تعداد پیژومترها نسبت به حالت اولیه است. شبیه‌سازی عددی روند تغییرات کروم در آبخوان دشت بیرجند در پژوهشی توسط Farpoor et al. (2019) انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات غلظت این آلاینده به نوسانات سطح آب زیرزمینی بستگی دارد و با افزایش سطح تراز آب می‌توان میزان کروم را در آبخوان کاهش داد.

تاکنون پژوهش‌هایی در زمینه طراحی شبکه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی یا سطحی انجام شده است که هدف عمده آن‌ها انتخاب مکان ایستگاه نمونه‌برداری و کاهش تعداد آن‌ها بدون زیاد شدن خطای اندازه‌گیری بود و روش‌های مختلفی نیز بدین منظور ارائه شده است نظیر (Khodaverdi et al. (2020), Kavusi et al. (2020), Kavusi et al. (2019), (Rezaei et al. و Jafarzadeh and Khasheisiuki (2018) (2015) که عمده این پژوهش‌ها در تلاش‌اند که شبکه پایش را بهینه‌سازی کنند. از طرفی در زمینه استفاده از روش PCA نیز پژوهش‌هایی نظیر (Alves, Rahnema and Sayari, (2019), et al. (2018) و Zhao et al. (2012) انجام گرفته که در این پژوهش‌ها و سایر پژوهش‌ها اغلب از روش PCA در شناسایی مهم‌ترین عوامل تغییر کیفیت آب استفاده شده است؛ بنابراین تاکنون پژوهشی در زمینه پایش پارامتر کیفی و شناسایی چاه‌های مؤثر انجام نشده است. همچنین تأثیر زمان بر تغییرات شبکه پایش در این پژوهش‌ها بررسی نشده است (نظیر BabaeiHessar et al. و Hooshangi et al. (2016) (2015)). کیفیت آب زیرزمینی نسبت به زمان تغییرات محسوسی داشته که می‌تواند در انتخاب محل برداشت نمونه‌برداری و تعداد آن‌ها تأثیر بگذارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بررسی توانایی روش PCA در طراحی شبکه پایش با عنایت به تأثیر گذشت زمان بر شناسایی چاه‌های نمونه‌برداری مؤثر در آبخوان دشت می‌تواند نوآوری‌های این پژوهش باشد که در سایر پژوهش‌ها به آن پرداخته نشده است. همچنین در ادامه

طبیعی بودن میزان مس، میزان آلودگی آب آشامیدنی شهر بیرجند با کروم خطرناک است. با در نظر گرفتن شرایط محیطی، احتمالاً این آلودگی منشأ زمین‌شناسی دارد که نیازمند مطالعات بیشتر و تلاش در جهت رفع آن می‌باشد. در پژوهشی چاه‌های مؤثر در تعیین تراز آب زیرزمینی دشت قیدار با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی شناسایی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با حذف چاه‌هایی که اهمیت نسبی آن‌ها کم‌تر از ۰/۵ می‌باشد، خطای تعیین تراز سطح آب زیرزمینی کم‌تر از ۱۳٪ خواهد بود (Noorigheidari 2013). پژوهشی به‌منظور تعیین تعداد بهینه چاه‌های پیژومتری جهت تخمین سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت تبریز با استفاده از روش PCA توسط Hooshangi et al. (2015) انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که با حذف ۳۰ چاه از ۷۵ چاه موجود در منطقه، می‌توان با افزایش دقت اندازه‌گیری سطح آب در بقیه چاه‌های پیژومتری باقی‌مانده و صرفه‌جویی در زمان و هزینه، سطح آب زیرزمینی را با دقت خوبی تخمین زد. (BabaeiHessar et al. (2016) چاه‌های مؤثر در تعیین سطح تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه را شناسایی کردند. در این پژوهش، چاه‌های کم‌اهمیت با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی تعیین گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با حذف چاه‌های کم‌اهمیت که تعداد آن‌ها حدوداً نصف کل چاه‌ها است، ضریب تغییرات سطح ایستایی ۵۱٪ کاهش یافت و خطای تعیین سطح ایستایی کم‌تر از ۱۵٪ به‌دست آمد. در پژوهشی (Jafarzadeh and Khasheisiuki (2018) به‌منظور پایش کمی آبخوان دشت بیرجند و تعیین نقاط بهینه پیژومترها یک روش جدید تحت عنوان^۱GNM را پیشنهاد دادند. در روش پیشنهادشده از دو مدل شبکه عصبی و جستجوی گرگ خاکستری به‌عنوان مدل شبیه‌ساز سطح آب زیرزمینی و مکان‌یابی موقعیت پیژومترها استفاده کردند. نتایج نشان داد با توجه به مقادیر شاخص‌های ارزیابی در قسمت شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی مدل GNM که با استفاده از شبکه عصبی انجام شد، مدل پیشنهادشده از کارایی مناسبی در این زمینه برخوردار بود. در نهایت موقعیت ۱۰ پیژومتر جدید در آبخوان بیرجند با استفاده از مدل GNM تعیین شد. در پژوهشی Kavusi et al. (2019) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO به‌منظور

^۱Gray wolf and Neural Network Monitoring



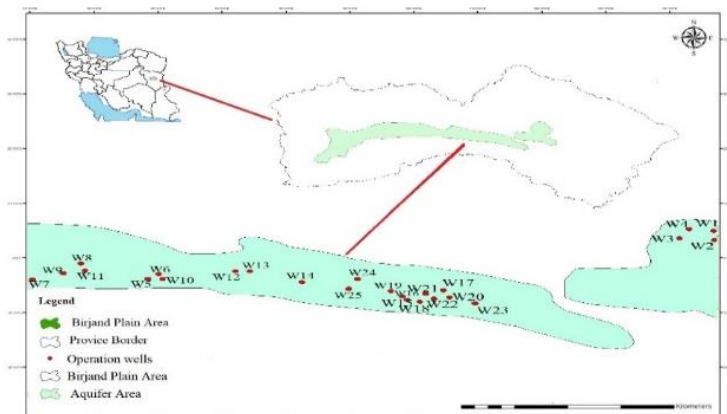
در این پژوهش، از آمار ۲۵ حلقه چاه نظارت شده توسط وزارت نیرو (چاه ۱ مرک (W1)، چاه ۲ مرک (W2)، چاه ۳ مرک (W3)، چاه ۴ مرک (W4)، چاه ۱ رکات (W5)، چاه ۲ رکات (W6)، چاه ۴ رکات (W7)، چاه ۵ رکات (W8)، چاه ۶ رکات (W9)، چاه ۷ رکات (W10)، چاه ۸ رکات (W11)، چاه ۹ رکات (W12)، چاه ۱۰ رکات (W13)، چاه ۱۱ رکات (W14)، چاه ۶ علی آباد (W15)، چاه ۷ علی آباد (W16)، چاه ۸ علی آباد (W17)، چاه ۹ علی آباد (W18)، چاه ۱۰ علی آباد (W19)، چاه ۱۱ علی آباد (W20)، چاه ۱۲ علی آباد (W21)، چاه ۱۳ علی آباد (W22)، چاه ۱۴ علی آباد (W23)، چاه ۳ طهماسبی (W24)، چاه ۴ مدرس (W25)) استفاده شده است. برای آنالیز مؤلفه‌های اصلی از داده‌های سالانه کروم آب زیرزمینی این چاه‌ها که از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ ثبت گردیده، استفاده شده است. در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و نحوه پراکنش چاه‌های مورد بررسی در این پژوهش ارائه شده است.

به مقایسه روش PCA و آنتروپی در طراحی شبکه پایش کروم در منطقه پرداخته خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت بیرجند بخشی از حوضه آبریز کویر لوت است. این محدوده در طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۰ ثانیه تا ۳۳ درجه شمالی و به مرکزیت تقریبی شهر بیرجند واقع گردیده است. این دشت از شرق به ارتفاعات مؤمن‌آباد و سیستان، از جنوب به کوه‌های باقران، بنددره و کوه رج، از شمال به ارتفاعات شاه ناصر و اسفدن و از غرب به ارتفاعات چنگ‌در و گرونک محدود می‌شود. (Asgari 2011). منشا عناصر سنگین در دشت و شهر بیرجند متعلق به کرتاسه می‌باشد که شامل افیولیت‌ها و آمیزه‌های رنگین است. رسوبات آبرفتی که سراسر دشت را می‌پوشانند، محل ذخیره آب‌های زیرزمینی می‌باشند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و چاه‌های مورد بررسی

Fig. 1. Location of the study area and wells

چندمتغیره به مؤلفه‌هایی تجزیه می‌شوند؛ چنان‌که نخستین مؤلفه اصلی (PC_1) تا آنجا که ممکن است، بیش‌ترین واریانس موجود در داده‌ها را توجیه کند. دومین مؤلفه اصلی (PC_2) - بیش‌ترین واریانس ممکن بعد از مؤلفه نخست را توجیه کند و تا آخر. مؤلفه‌های استخراج شده دارای دو ویژگی هستند: الف) دو به دو بر هم عمودند (مستقل از یکدیگر هستند)، ب) تعداد کل مؤلفه‌های اصلی با تعداد متغیرهای اولیه برابر است. نکته مهم در

۲-۲- روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

PCA از روش‌های آماری چند متغیره می‌باشد که می‌توان از آن برای کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرهای اولیه مسئله در مواردی که با حجم زیادی از اطلاعات روبرو هستیم و تفسیر بهتر آن‌ها، استفاده نمود (Noori et al. 2009). هدف از تحلیل مؤلفه‌های اصلی کاهش ابعاد داده‌ها (کاهش تعداد متغیرها) از طریق خلاصه‌سازی تعداد زیادی متغیر اولیه به تعداد کم‌تری مؤلفه اصلی است. برای این منظور، واریانس موجود در داده‌های

این نسبت، نشان‌دهنده اهمیت هر چاه نسبت به سایر چاه‌ها می‌باشد که در آن، N تعداد دفعاتی که هر چاه به‌عنوان چاه مؤثر شناخته‌شده و n تعداد دفعاتی که هر چاه در آنالیز شرکت کرده می‌باشد. هراندازه اهمیت نسبی یک چاه بیش‌تر باشد، تأثیر بیش‌تری در پایش خواهد داشت.

به‌منظور بررسی اثر حذف هر چاه از محاسبات از دو معیار ضریب تغییرات و خطای پایش استفاده شد. با استفاده از رابطه (۳) مقدار خطای پایش به ازای حذف چاه‌های غیر مؤثر در یک آستانه مشخص از مقایسه میانگین چاه‌های آن آستانه با میانگین کلیه چاه‌ها قابل‌محاسبه می‌باشد (Gurunathan and Ravichandran 1994).

$$Error = \frac{(m_n - m_0)}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

که، m_n متوسط مقادیر به ازای حذف چاه‌ها با توجه به اهمیت نسبی محاسبه‌شده، m_0 متوسط مقادیر کلیه چاه‌های موجود می‌باشد.

جهت در نظر گرفتن تغییرات زمانی در انتخاب چاه‌های مؤثر، آنالیز مؤلفه‌های اصلی در دو دوره زمانی ۲ ساله (۱۳۹۳-۱۳۹۴) و ۳ ساله (۱۳۹۵-۱۳۹۷) انجام شد. طول دوره زمانی با توجه به آمار اخذشده از شرکت آب و فاضلاب خراسان جنوبی در نظر گرفته شد. در این پژوهش برای پیاده‌سازی این روش از نرم‌افزار آماری SPSS.Ver 19 استفاده گردید.

۲-۳- تئوری آنتروپی

آنتروپی در اصل به معنای بی‌نظمی است؛ یعنی هر چقدر میزان بی‌نظمی یک سیستم بیش‌تر باشد، آنتروپی سیستم بیش‌تر می‌باشد. Shannon در سال ۱۹۴۸ نشان داد که وقایع با احتمال وقوع زیاد اطلاعات کم‌تری در اختیار می‌گذارند و برعکس هرچه قدر احتمال وقوع یک رخداد کم‌تر باشد، اطلاعات حاصل از آن بیش‌تر است. با به‌دست آوردن اطلاعات جدید، در واقع عدم قطعیت‌ها را کاهش داده و ارزش اطلاعات جدید برابر با مقداری است که از عدم قطعیت کاسته شده است. در نتیجه عدم قطعیت

مورد مؤلفه‌های اصلی آن است که این مؤلفه‌ها با چرخش^۱ محورهای مختصات در راستای بیش‌ترین واریانس به‌دست می‌آیند؛ چنان‌که زاویه بین محورهای مختصات پس از دوران تغییر نمی‌کند (Bazrafshan and Hejabi 2017).

برای محاسبه اهمیت هر چاه، از ضریب همبستگی بین مؤلفه‌های اصلی و داده‌های مشاهده‌شده استفاده می‌شود. ضریب همبستگی چاه با مؤلفه اصلی از رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$Cor(z_j, x_i) = a_{i,j+1}^T \lambda_j a_{i,j} \quad (1)$$

که، $a_{i,j}$ عنصر i ام از مؤلفه اصلی j ام می‌باشد. هر چه این ضریب بالا باشد، نشان‌دهنده بالا بودن اهمیت نسبی چاه می‌باشد (Sanchez- Martos et al. 2001).

تعداد چاه‌ها (p) طبق یک قاعده کلی باید کم‌تر یا حداکثر برابر تعداد مشاهدات (n) (که در اینجا همان تعداد سال‌های آماری است) باشد (Petersen 2001). با توجه به اینکه در این پژوهش از آمار سالانه داده کیفی کروم آبخوان دشت بیرجند که از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ ثبت‌شده در دسترس است، تعداد داده‌ها یا مشاهدات هر چاه ۵ مورد می‌باشد و برای پایش هر چاه از ۵ چاه مجاور استفاده‌شده است. به‌طور مثال برای پایش چاه W_{10} ، از ۵ چاه مجاور یعنی W_5, W_6, W_{11}, W_{12} و W_{13} استفاده شد. بنابراین، برای هر چاه یک ماتریس 5×5 وجود خواهد داشت. لازم به‌ذکر است در پایش از داده‌های خود چاه استفاده نمی‌شود، بلکه تنها از ۵ چاه مجاور استفاده می‌شود. سپس، برای هر کدام از چاه‌ها یک‌بار آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام شد تا ضریب همبستگی هر چاه با مؤلفه اصلی مشخص شود. در انتخاب چاه‌های مؤثر، چاه‌هایی که ضریب همبستگی کم‌تر از 0.75 داشته‌اند، حذف شد (Ouyang 2005). بدین ترتیب برای هر بار آنالیز مؤلفه اصلی، تعدادی چاه به‌عنوان چاه مؤثر شناسایی شدند و در نهایت، تعداد دفعاتی که هر چاه در آنالیز شرکت کرده و همچنین تعداد دفعاتی که به‌عنوان چاه مؤثر شناخته‌شده است، مشخص شد. جهت مشخص کردن اهمیت نسبی هر چاه از رابطه (۲) استفاده گردید.

$$Relative\ importance = \frac{N}{n} \quad (2)$$

^۱Rotation



(۶) به کار برد، اطلاعات دریافتی و ارسالی ایستگاه i ام نیز به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$R(i) = R(x(i), \hat{x}(i)) \quad (7)$$

$x(i)$ بیان کننده داده‌های چاه i ام و $\hat{x}(i)$ از رابطه خطی (۸) به دست می‌آید.

$$\hat{x}(i) = a(i) + \sum_{j=1}^{I-1} y_j(i) \times b_j(i) \quad (8)$$

$y(i)$ ماتریس داده‌ها از تمام ایستگاه‌های دیگر و $a(i)$ و $b(i)$ پارامترهای رگرسیون بین ایستگاه i ام و تمام ایستگاه‌های دیگر است که به صورت خطی برازش داده شده است.

روابط فوق بیانگر آن است که مقادیر بزرگتر $R(i)$ و $S(i)$ به ترتیب به معنای دریافت و ارسال بیشتر اطلاعات بین ایستگاه i ام و سایر ایستگاه‌های شبکه و یا برقراری بهتر ارتباط بین این ایستگاه و سایر ایستگاه‌ها است. بدین ترتیب مقادیر بیشتر $R(i)$ و $S(i)$ برای یک ایستگاه به معنای ارزش بیشتر تر ایستگاه یاد شده است و حفظ و نگهداری ایستگاه مزبور توصیه می‌شود؛ اما شاخص $N(i)$ با نام اطلاعات خالص تبادلی به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$N(i) = S(i) - R(i) \quad (9)$$

شاخص $N(i)$ بیان کننده اطلاعات کل خالص هر چاه بوده و هر ایستگاهی که کمترین میزان $N(i)$ را داراست، کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه پایش به خود اختصاص می‌دهد (Markus et al. 2003).

۳- یافته‌ها و بحث

جدول (۱) ماتریس ضرایب همبستگی برای پایش چاه شماره ۱۰ را نشان می‌دهد. مطابق این جدول دو مؤلفه PC_1 و PC_2 دارای واریانس بیش‌تری نسبت به سایر مؤلفه‌ها می‌باشند. همچنین چاه‌های W_5, W_6, W_{11}, W_{12} را که دارای ضریب همبستگی بالای ۰/۷۵ هستند، به عنوان چاه‌های مؤثر در پایش چاه W_{10} انتخاب نمود. این آنالیز برای ارزیابی اثر تمامی چاه‌ها انجام گرفت تا تعداد دفعاتی که هر چاه مؤثر واقع می‌شود، تعیین گردد. سپس

و اطلاعات پارامترها وابسته به هم هستند. به عبارت دیگر، از تئوری آنتروپی می‌توان به عنوان شاخصی برای کمی کردن میزان عدم قطعیت و دانش نسبت به مشخصات یک شبکه استفاده نمود.

طبق تعریف ارائه شده توسط Shannon (1948)، برای دو متغیر گسسته x و y که $x_i, i=1,2,3, \dots, n$ و $y_j, j=1,2,3, \dots, m$ همان فضای احتمال باشند، هر کدام دارای یک احتمال گسسته وقوع $p(x_i, y_j)$ احتمال مشترک $p(x_i | y_j)$ و $p(y_j | x_i)$ احتمال رخ دادن x_i به شرط y_j می‌باشند (Shannon, 1948).

انتقال اطلاعات در این روش با استفاده از شاخص انتقال اطلاعات نرمال که با ITI^1 نشان داده می‌شود، بیان می‌گردد؛ که میزان اطلاعات استاندارد که از یک مکان به مکان دیگری منتقل می‌شود را نشان می‌دهد (رابطه ۴).

$$ITI = \frac{T(x, y)}{H(x, y)} \quad (4)$$

که در آن $T(x, y)$ آنتروپی انتقال اطلاعات و $H(x, y)$ آنتروپی مشترک داده‌هاست.

همچنین می‌توان سه شاخص $R(i), S(i)$ و $N(i)$ را با استفاده از رابطه (۵) و به صورت یک تبدیل کسری آنتروپی x با نماد $R(x, y)$ که یک کاهش عدم قطعیت از x اگر y معلوم باشد و در واقع اطلاعات دریافتی توسط x از y نیز است، تعریف نمود.

$$R(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(x)} \quad (5)$$

که می‌تواند به عنوان یک کاهش عدم اطمینان از x در صورتی که y معلوم باشد یا به بیان دیگر میزان اطلاعات دریافتی چاه x از چاه y را نشان می‌دهد. همانند اطلاعاتی که از x به y فرستاده شده است، به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$S(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(y)} \quad (6)$$

معادلات بالا روابط بین دو متغیر x و y را بیان می‌کند. همین استدلال را می‌توان برای هر یک از چاه‌ها با استفاده روابط (۵) و

¹Information Transfer Index



جدول (۲) اهمیت نسبی هر چاه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. هر چاهی که دارای رتبه بالاتری باشد، از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. با توجه به رتبه‌بندی چاه‌ها، در آستانه ۰، کلیه چاه‌ها در آنالیز شرکت داده می‌شوند و در آستانه ۱، چاه‌هایی که دارای رتبه ۱ هستند، مورد قبول واقع می‌شوند. با توجه به جدول (۲) تعداد ۶ چاه با رتبه ۱ وجود دارد. به این معنی که از بین تمامی چاه‌ها، چاه‌های W₃، W₄، W₇، W₁₂، W₂₄ و W₂₅ از بالاترین اهمیت برخوردارند و به همان تعداد که در آنالیز شرکت کرده‌اند، به‌عنوان چاه مؤثر شناخته شده‌اند. تعداد چاه‌های مؤثر برای هر آستانه به‌ترتیب برابر با ۲۵، ۲۳، ۲۰، ۱۵، ۹ و ۶ خواهد بود.

با توجه به مشخص بودن تعداد دفعاتی که یک چاه در آنالیز مؤلفه‌های اصلی شرکت داده‌شده است، اهمیت نسبی هر چاه محاسبه می‌شود.

جدول ۱- ماتریس ضریب همبستگی پایش چاه W₁₀
Table 1 Correlation Coefficient Matrix of W₁₀ Well Monitoring

Principal Component (PCj)		Wells (Wi)
PC ₂	PC ₁	
-0.508	0.842	W ₅
0.198	0.972	W ₆
0.911	0.298	W ₁₁
0.488	0.837	W ₁₂
-0.841	0.524	W ₁₃

جدول ۲- رتبه‌بندی چاه‌ها بر اساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی

Table 2 Wells ranking based on principal component analysis

Rank	Number of times they participated in the analysis.	Number of times it has been identified as an effective well.	Well	Rank	Number of times they participated in the analysis.	Number of times it has been identified as an effective well.	Well
0.60	5	3	W ₁₀	1.00	3	3	W ₃
0.60	5	3	W ₁₆	1.00	3	3	W ₄
0.57	7	4	W ₂₁	1.00	3	3	W ₇
0.56	9	5	W ₅	1.00	4	4	W ₁₂
0.50	6	3	W ₁₈	1.00	1	1	W ₂₄
0.43	3	3	W ₁₅	1.00	1	1	W ₂₅
0.40	5	2	W ₁₄	0.89	9	8	W ₆
0.33	6	2	W ₁₁	0.86	7	6	W ₂₀
0.33	6	2	W ₂₃	0.86	7	6	W ₂₂
0.20	5	1	W ₉	0.75	4	3	W ₁₉
0.00	4	0	W ₈	0.67	3	2	W ₁
0.00	2	0	W ₁₃	0.67	3	2	W ₂
				0.67	3	2	W ₁₇

متوسط ضریب تغییرات تغییر چندانی نمی‌کند، یعنی اگر حد آستانه بین ۰ تا ۰/۶ باشد، با حذف چاه‌های کم‌اهمیت خطای چندانی در نمایش مقدار کروم آب زیرزمینی آبخوان رخ نمی‌دهد. ولی اگر حد آستانه از ۰/۶ بالاتر رود یعنی چاه‌های زیادی حذف شوند، ضریب تغییرات زیاد می‌شود؛ بنابراین، حد آستانه مطلوب ۰/۶ بوده که در این آستانه از ۲۵ حلقه چاه، ۱۵ حلقه به‌عنوان چاه مؤثر شناسایی شده و بقیه چاه‌ها به‌عنوان چاه‌های کم‌اهمیت شناخته می‌شوند. بدین ترتیب با ۱۵ حلقه چاه در منطقه می‌توان در وقت و هزینه صرفه‌جویی نمود و دقت زیادی در اندازه‌گیری و قرائت چاه‌های مهم جهت بالا بردن دقت مدل‌سازی به عمل آورد.

پژوهش‌گران برای بررسی مقدار خطا در انتخاب تعداد چاه‌های مؤثر، محاسبه ضریب تغییرات برای چاه‌های باقی‌مانده در هر آستانه و مقایسه آن با ضریب تغییرات مربوط با کلیه چاه‌ها را پیشنهاد نموده‌اند (Noorigheidari 2013). این روش در صورتی قابل قبول است که فرض شود ضریب تغییرات با حذف چاه‌های غیر مؤثر افزایش یابد. به این ترتیب آستانه‌ای که در آن کم‌ترین اختلاف در ضریب تغییرات رخ دهد، انتخاب می‌شود. در شکل (۲) متوسط ضریب تغییرات در مقابل حد آستانه رسم شده است. بدین ترتیب که ضریب تغییرات برای هر سال آماری محاسبه و پس از برآورد مقدار متوسط آن، در مقابل حد آستانه رسم شد. با توجه به شکل (۲) در حد آستانه ۰ تا ۰/۶ مقدار



